

УЧЕТ МНОГОСЛОЙНОЙ ЗЕМЛИ В РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЕДИНЕННЫХ БЕСКОНЕЧНО ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ СТЕКАНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Магистр техн. наук ДЕРЮГИНА Е. А.

Белорусский национальный технический университет

В [1] получены приближенные формулы для расчета электромагнитных характеристик (сопротивление стержня заземлителя, сопротивление растеканию переменного тока в земле, напряжение на заземлителе) уединенного бесконечно длинного заземлителя, основанные на распределении плоской электромагнитной волны. В этих формулах стержень заземлителя и земля рассматриваются как однородные среды с постоянными электрическими проводимостями и магнитными проницаемостями. Земля, как правило, обладает неоднородной структурой с хорошо выраженными слоями, а удельные сопротивления отдельных слоев различны. Последнее учитывается представлением земли как многослойной среды (многослойная земля) с постоянными в каждом слое удельными электрическими сопротивлениями [2]. Кроме того, в последние время широко применяются двухслойные заземлители – стальные стержни, покрытые медью толщиной 0,25 мм [3].

Ниже рассматривается приближенный расчет электромагнитных характеристик уединенного бесконечно длинного вертикального стержневого заземлителя с учетом многослойной структуры земли и двухслойной структуры самого стержня при стекании переменного тока промышленной частоты. Модель, учитывающая многослойную структуру земли и двухслойный стержень, приведена на рис. 1. Слои обладают своими электрическими проводимостями и магнитными проницаемостями.

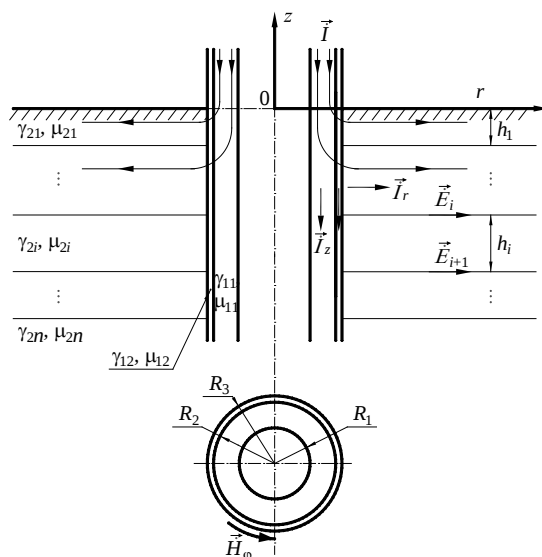


Рис. 1. Геометрическая модель уединенного бесконечно длинного двухслойного стержневого заземлителя в многослойной земле

Для приближенного расчета электромагнитных характеристик двух-слойного стержня в многослойной земле используем формулы, основанные на распределении плоской электромагнитной волны по глубине стержня. Такое приближение для однородной земли дает результаты, отличающиеся не более чем на 2 % в сравнении с численным решением уравнений Максвелла [1].

В земле в данном случае существуют только радиальная составляющая плотности тока [1] и соответственно радиальная составляющая напряженности электрического поля. Выражение для расчета напряженности электрического поля в каждом слое земли с учетом ее непрерывности на границах раздела имеет вид [4]:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{imr}(r, z') &= \frac{\dot{I}_m}{2\pi r} \left(\dot{E}_i \frac{\text{sh}(\alpha_{2i}(h_i - z'))}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} + \dot{E}_{i+1} \frac{\text{sh}(\alpha_{2i}z')}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} \right), i = 1, \dots, n-1, z' \in [0, h_i]; \\ \dot{E}_{imr}(r, z') &= \frac{\dot{I}_m}{2\pi r} \dot{E}_i e^{-\alpha_{2i}z'}, i = n, z' \in [0, \infty],\end{aligned}\quad (1)$$

где $\dot{I}_m$ – комплексная амплитуда тока, стекающего в заземлитель; $\dot{E}_i$, $\dot{E}_{i+1}$ – неизвестные напряженности электрического поля на границах i -го слоя (рис. 1); h_i – толщина i -го слоя земли; $z' = -z + \sum_{k=1}^i h_k$ – локальная координата i -го слоя; $\alpha_{2i} = \sqrt{j\omega\gamma_{2i}\mu_{2i}}$; ω – угловая частота переменного тока.

Напряженность магнитного поля для каждого слоя земли находится из закона электромагнитной индукции

$$\dot{H}_{im\phi}(r, z') = \frac{\dot{I}_m}{2\pi r} \sqrt{\frac{\gamma_{2i}}{j\omega\mu_{2i}}} \left(\dot{E}_i \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}(h_i - z'))}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} - \dot{E}_{i+1} \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}z')}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} \right). \quad (2)$$

Неизвестные напряженности электрического поля $\dot{E}_i$ ($i = 1, \dots, n$) находятся из закона полного тока и равенства напряженностей магнитного поля на границах раздела слоев:

$$\begin{aligned}\sqrt{\frac{\gamma_{2i}}{j\omega\mu_{2i}}} \left(\dot{E}_i \text{cth}(\alpha_{2i}h_i) - \dot{E}_{i+1} \frac{1}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} \right) &= 1, \quad i = 1; \\ \dot{E}_i \frac{\alpha_{2i}}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} - \dot{E}_{i+1} (\alpha_{2i} \text{cth}(\alpha_{2i}h_i) + \alpha_{2i+1} \text{cth}(\alpha_{2i+1}h_{i+1})) + \\ &+ \dot{E}_{i+2} \frac{\alpha_{2i+1}}{\text{sh}(\alpha_{2i+1}h_{i+1})} = 0, \quad i = 2, \dots, n-2; \\ \dot{E}_i \frac{\alpha_{2i}}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} - \dot{E}_{i+1} (\alpha_{2i} \text{cth}(\alpha_{2i}h_i) + \alpha_{2i+1}) &= 0, \quad i = n-1.\end{aligned}\quad (3)$$

Из решения системы (3) определяем искомые напряженности электрического поля и напряженности электрического и магнитного полей по (1)

и (2) соответственно. По их величинам на поверхности земли рассчитываем сопротивление растеканию переменного тока [1]

$$\underline{Z}_3(R) = R_3(R) + jX_3(R) = \frac{2\pi}{|\dot{I}_m|^2} \int_{R_3}^R r \dot{E}_{1mr}(r, 0) \dot{H}_{1m\varphi}^*(r, 0) dr = \frac{\dot{I}_m^*}{|\dot{I}_m|^2} \int_{R_3}^R \dot{E}_1 dr, \quad (4)$$

где $R_3(R)$, $X_3(R)$ – активное и индуктивное сопротивления растеканию переменного тока в земле; $\dot{H}_{1m\varphi}^*(r, 0)$ – комплексно-сопряженная амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности земли; $\dot{I}_m^*$ – то же тока, стекающего в заземлитель; R – расстояние до стержня заземлителя с обратным током [1].

Для дальнейшего расчета сопротивления стержня заземлителя с учетом его двухслойной структуры (наличие медного покрытия) необходимо знать величины тангенциальных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей на его боковой поверхности. При их определении учтем, что для медного покрытия поверхностный эффект отсутствует, так как его толщина значительно меньше глубины проникновения электромагнитной волны, а для стали он, наоборот, выражен, так как толщина стенки больше глубины проникновения электромагнитной волны. Кроме того, в стержне заземлителя учитываем только вертикальную составляющую плотности тока, а радиальной пренебрегаем [1]. Тогда напряженность магнитного поля на боковой поверхности стержня определяется по (2) при $r = R_3$

$$\dot{H}_{1m\varphi}(R_3, z') = \frac{\dot{I}_m}{2\pi R_3} \sqrt{\frac{\gamma_{2i}}{j\omega\mu_{2i}}} \left(\dot{E}_i \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}(h_i - z'))}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} - \dot{E}_{i+1} \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}z')}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} \right). \quad (5)$$

Аналогично выражение для вертикальной составляющей напряженности электрического поля на боковой поверхности стержня принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1mz}(R_3, z') = & \frac{\alpha_{11} a \dot{I}_m}{j\alpha_{11}\pi\gamma_{12}a(R_3^2 - R_2^2) + 2\pi\gamma_{11}R_2} \sqrt{\frac{j\gamma_{2i}}{\omega\mu_{2i}}} \times \\ & \times \left(\dot{E}_i \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}(h_i - z'))}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} - \dot{E}_{i+1} \frac{\text{ch}(\alpha_{2i}z')}{\text{sh}(\alpha_{2i}h_i)} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_{11} = \sqrt{j\omega\gamma_{11}\mu_{11}}$; $a = \frac{J_1(\chi_1)H_0^{(2)}(\chi_2) - J_0(\chi_2)H_1^{(2)}(\chi_1)}{J_1(\chi_1)H_1^{(2)}(\chi_2) - J_1(\chi_2)H_1^{(2)}(\chi_1)}$; $J_0(\chi)$, $J_1(\chi)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; $H_0^{(2)}(\chi)$, $H_1^{(2)}(\chi)$ – функции Бесселя третьего рода (вторая функция Ганкеля) нулевого и первого порядка соответственно; $\chi_1 = j\alpha_{11}R_1$; $\chi_2 = j\alpha_{11}R_2$.

Сопротивление двухслойного стержня рассчитывается по напряженностям электрического и магнитного полей на его боковой поверхности [1]

$$\underline{Z}_c = R_c + jX_c = \frac{2\pi R_3}{|\dot{I}_m|^2} \left(\int_0^{z'_1} \dot{E}_{1mz}(R_3, z') \dot{H}_{1m\phi}^*(R_3, z') dz + \dots + \int_0^{z'_i} \dot{E}_{imz}(R_3, z') \dot{H}_{im\phi}^*(R_3, z') dz + \dots + \int_0^{z'_n} \dot{E}_{nmz}(R_3, z') \dot{H}_{nm\phi}^*(R_3, z') dz \right), \quad (7)$$

где R_c , X_c – активное и индуктивное сопротивления стержня заземлителя; $\dot{H}_{im\phi}^*(R_3, z')$ – комплексно-сопряженная амплитуда напряженности магнитного поля на боковой поверхности стержня.

Полное сопротивление заземлителя складывается из сопротивления собственно заземляющего стержня $\underline{Z}_c$ и сопротивления растеканию переменного тока в земле $\underline{Z}_3(R)$

$$\underline{Z}(R) = R_a(R) + jX(R) = \underline{Z}_c + \underline{Z}_3(R), \quad (8)$$

где $R_a(R)$, $X(R)$ – активное и индуктивное сопротивления заземлителя.

Действующее значение напряжения на заземлителе определяется по формуле

$$\dot{U}(R) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{R_3}^R \dot{E}_1 dr. \quad (9)$$

На практике в большинстве случаев многослойную землю представляют в виде двухслойной, состоящей из верхнего (сезонного) слоя толщиной h_1 и второго слоя, не подверженного сезонным изменениям. При этом толщина верхнего слоя принимается равной не более 3 м [2].

Для такого случая итоговые выражения для расчета электромагнитных характеристик заземлителя принимают вид:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_3(R) &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu_{21}}{\gamma_{21}}} \ln \frac{R}{R_3} \frac{\alpha_{21} \operatorname{sh}(\alpha_{21}h_1) \operatorname{ch}(\alpha_{21}h_1) + \alpha_{22} \operatorname{sh}^2(\alpha_{21}h_1)}{\alpha_{21} \operatorname{ch}^2(\alpha_{21}h_1) + \alpha_{22} \operatorname{sh}(\alpha_{21}h_1) \operatorname{ch}(\alpha_{21}h_1) - \alpha_{21}}; \\ \underline{Z}_c &= \frac{2\pi R_3}{|\dot{I}_m|^2} \left(\int_0^{z'_1} \dot{E}_{1mz}(R_3, z') \dot{H}_{1m\phi}^*(R_3, z') dz + \int_0^{z'_2} \dot{E}_{2mz}(R_3, z') \dot{H}_{2m\phi}^*(R_3, z') dz \right); \quad (10) \\ \dot{U}(R) &= \frac{\dot{I}_m}{2\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu_{21}}{2\gamma_{21}}} \ln \frac{R}{R_3} \frac{\alpha_{21} \operatorname{sh}(\alpha_{21}h_1) \operatorname{ch}(\alpha_{21}h_1) + \alpha_{22} \operatorname{sh}^2(\alpha_{21}h_1)}{\alpha_{21} \operatorname{ch}^2(\alpha_{21}h_1) + \alpha_{22} \operatorname{sh}(\alpha_{21}h_1) \operatorname{ch}(\alpha_{21}h_1) - \alpha_{21}}. \end{aligned}$$

На основе полученных выражений в среде программирования MatLab разработана программа расчета и проведено численное моделирование электромагнитных характеристик бесконечно длинных двухслойных стержневых заземлителей в многослойной земле. В качестве примера приведены результаты расчета характеристик стального и стального омедненного заземлителей радиусом $R_2 = 50$ мм с толщиной стенки стали $d_1 = R_2 - R_1 = 3,5$ мм и толщиной медного покрытия $d_2 = R_3 - R_2 = 0,25$ мм в двухслойной земле (рис. 2). При этом толщина первого (верхнего) слоя земли h_1 изменялась в пределах от 0 до 1000 м. В расчетах приняты:

для стали: $\gamma_{11} = 6,8 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_{11} = 700 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; для меди: $\gamma_{12} = 5,6 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_{12} = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для слоев земли проводимость принималась равной 0,01 и 0,001 См/м, магнитная проницаемость для всех слоев $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

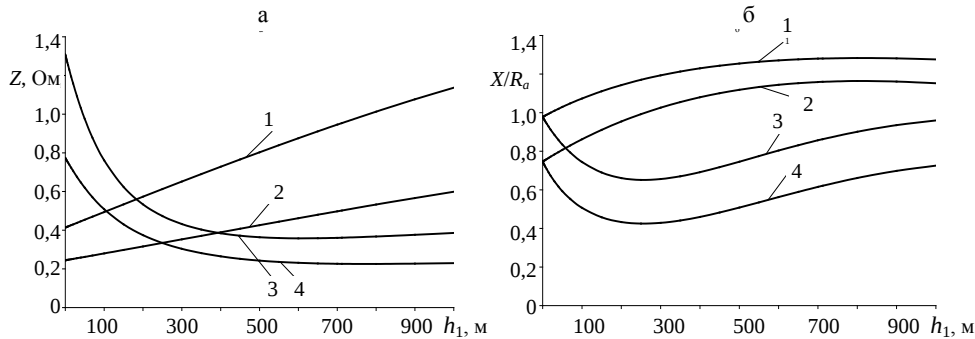


Рис. 2. Зависимость полного сопротивления Z (а) и отношения индуктивного сопротивления к активному X/R_a (б) от толщины первого слоя h_1 при $R = 20$ м; 1 – стальной заземлитель при $\gamma_{21} = 0,001$ См/м и $\gamma_{22} = 0,01$ См/м; 2 – стальной омедненный заземлитель при $\gamma_{21} = 0,001$ См/м и $\gamma_{22} = 0,01$ См/м; 3 – стальной заземлитель при $\gamma_{21} = 0,01$ См/м и $\gamma_{22} = 0,001$ См/м; 4 – стальной омедненный заземлитель при $\gamma_{21} = 0,01$ См/м и $\gamma_{22} = 0,001$ См/м

Для рассматриваемого примера чем больше толщина h_1 слоя с лучшей проводимостью, тем меньше полное сопротивление заземлителя. При худшей проводимости первого слоя увеличение его толщины ведет, наоборот, к росту сопротивления (рис. 2а). При этом величины сопротивлений при $h_1 = 0$ совпадают с результатами, полученными для однородной земли [1]. Наличие медного покрытия стержня уменьшает его индуктивное сопротивление, а следовательно, и полное сопротивление заземлителя, так как поверхностный эффект в таких заземлителях выражен меньше, чем в стальных. При лучшей проводимости первого слоя земли активное сопротивление заземлителя больше индуктивного и их отношение меньше 1 и, наоборот, если первый слой имеет худшую проводимость, то индуктивное сопротивление преобладает над активным и их отношение больше 1 (рис. 2б). Данные результаты согласуются с результатами, полученными в [5]. Результаты численного моделирования также показывают, что толщина первого слоя h_1 менее 10 м незначительно влияет на сопротивление бесконечно длинного заземлителя.

ВЫВОДЫ

1. Предложены приближенные формулы, учитывающие многослойную землю и двухслойную структуру стержня, для расчета электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных вертикальных стержневых заземлителей при стекании тока промышленной частоты.

2. При лучшей проводимости верхнего слоя земли активное сопротивление заземлителя преобладает над индуктивным и, наоборот, при худшей проводимости верхнего слоя индуктивное сопротивление больше активного. Слой сезонных изменений земли незначительно влияет на сопротивления бесконечно длинных заземлителей. Наличие медного покрытия стальных заземлителей снижает сопротивление бесконечно длинного стержня заземлителя по сравнению со стальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 4. – С. 5–13.
2. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Лобода, М. Международные стандарты по качеству заземляющих электродов / М. Лобода, Р. Марциняк // Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: сб. докл. Новосибирск, 22–25 марта 2005 г. / Сибирская энергетическая академия; редкол.: Ю. В. Целебровский [и др.]. – Новосибирск, 2005. – С. 25–35.
4. Туровский, Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский; пер. с польск. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
5. Карякин, Р. Н. Входное сопротивление протяженного вертикального заземлителя в многослойной земле / Р. Н. Карякин, В. К. Добрынин // Электричество. – 1975. – № 8. – С. 18–21.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 16.09.2010

УДК 656.132.6:621.33

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМОЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. ОПЕЙКО О. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Инженеры ПТАШНИК А. И., ХИЛЬМОН В. И.

УП «Белкоммунмаш»

Для повышения качества городского электротранспорта необходимо улучшение эксплуатационных характеристик и динамических свойств тягового электропривода. Важное требование к тяговому электроприводу – формирование режима постоянства мощности. Такой режим присущ приводу постоянного тока последовательного возбуждения, который широко применяется в городском электротранспорте. Асинхронный тяговый электродвигатель дает очевидные преимущества в простоте эксплуатации по сравнению с приводом постоянного тока. При частотном двухзонном регулировании скорости можно сформировать благоприятный режим, близкий к постоянству мощности как при скалярном, так и при векторном управлении. Предпочтение отдается векторному управлению, которое позволяет формировать благоприятные для работы транспорта динамические характеристики, а также создает условия для экономии электроэнергии.